

複雑なエネルギーシステム運用保守の ための先進的情報基盤高度化に 関する実験研究

吉川榮和¹、森下和功²、小林進二²、新田純也³、松岡 猛⁴、
高橋 信⁵、安部正高⁶、五福明夫⁷、出町和之⁸

1 京都大学名誉教授

3 アルカディア・システムズ(株)

5 東北大学大学院工学研究科

7 岡山県立大学

2 京都大学エネルギー理工学研究所

4 宇都宮大学地域創成推進機構、

6 京都大学大学院エネルギー科学研究科、

8 東京大学大学院工学系研究科

1. はじめに

本研究は、京大エネルギー理工学研究所にはゼロエミッションエネルギーインフラを構成する計測器、電動機、変圧器、弁、配管、電線ケーブル等が多数の実験設備で用いられているので、個々の機器の劣化や故障診断手法の開発検証の場として活用し、設備全体の信頼性評価やリスク予測解析手法の開発検証を実験的に行うことで、複雑なエネルギーシステムの運用管理のための高度 ICT 基盤の構成に役立つことに着目して開始した。その経緯は、まず、2022-2023 年の 2 年間は京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッション (Ze) 研究拠点による提案型共同研究『複雑なエネルギーシステムの先進的な故障診断・信頼性評価手法の実験研究』を実施した。この成果を発展して 2024 年には企画型共同研究テーマ 3 (エネルギー科学のデジタルトランスフォーメーション (DX) の学理) として研究の発展を志向して取り組んだ。

本報告は、この先行研究の経過と本年度実施した共同研究『複雑なエネルギーシステム運用保守のための先進的情報基盤高度化に関する実験研究』の結果をまとめ、今後の展望を行ったものである。以下、第 2 章では既往の 2022-2023 年の 2 年間の共同研究の結果とそれを踏まえて設定した 2024 年度の研究計画を述べる。第 3 章では 2024 年度の共同研究の実施経過と主要な研究成果の要点を述べる。第 4 章では本年度の共同研究の結論を要約し、今後の展望を述べる。

2. 2022-2023 年の 2 年間の実施結果の要約と 2024 年の研究計画

2. 1 2022 年度の研究結果の概要

2022 年度は、電気機器の高調波診断システムを京大エネルギー理工学研究所の所有する加速器による材料照射を目的とする DuET 実験施設に適用して電気機器の劣化診断を行うとともに、原子力発電所の保全管理における確率論的リスク評価法の適用状況と施設の監視カメラの AI による自動画像認識の研究状況を調査した。

リスク情報に基づく保全 (risk-informed maintenance) に移行する機運にある原子力発電事業におけるリスク情報に基づく保全の指向する方法論と、原子力施設でのセキュリティ対策の一環として施設の監視カメラ画像に AI 画像認識を適用する研究状況の調査結果はシンビオ社会研究会の令和 4 年度第 1 回研究談話会で発表した⁽¹⁾。また機器構成が比較的単純なエネルギー理工学研究所の DuET 実験施設に電気機器の高調波診断システムを設置しその施設を構成する電動機等の電気機器の劣化検知診断実験を行った結果と、従来 ET/FTA による PSA では取り扱いが困難な Phased mission 問題の取り扱いを可能とするようにシステムの動的信頼性解析法 GO FLOW の解析機能を向上させたことの紹介が令和 4 年度第 2 回研究談話会で発表された⁽²⁾。DuET 実験施設の全容を図 1 に示す。

DuET 実験施設の真空ポンプ等電気機器の高調波診断システムを設置して連続モニタリングした結果観測された高調波はモータが架台に固定されていないためであることがモータ新田純也により報告された。



図1 DuET 設備全容

2. 2 2023 年度の研究成果の概要

2023 年度は、機器構成が前年度の DuET 実験設備より複雑なヘリオトロン核融合実験施設を対象にその構成機器の劣化診断、故障検知実験を行うためにヘリオトロン J 実験装置とプラズマ計測の詳細を調査し高調波劣化診断システムの現場設置実験と解析、GO FLOW による信頼度解析モデルにより動的信頼性の定量評価も実施した。また核融合プラズマのシミュレーションにデータ同化の概念を適用する新たな研究課題を調査した。

2023 年度第 1 回シンビオ講演会ではヘリオトロン J 実験装置の構成とプラズマ計測についての小林進二による講演⁽³⁾ののち、2023 年 6 月 29 日、2023 年度の共同研究の実施計画を討議するとともにヘリオトロン核融合実験施設の実験設備の見学会を行った。その結果ヘリオトロン J 設備を対象に、①電気機器の高調波診断システムによる劣化診断（新田純也）、②GO FLOW によるヘリオトロン J 実験設備の信頼性評価（松岡猛）、③データ同化の適用によるプラズマシミュレーションの高度化（黒江康明）の 3 つのテーマを、それぞれ()内のメンバーが実施することとした。

ヘリオトロン J 実験設備の主要コンポーネントの全容を図 2 に示し、ヘリオトロン J のプラズマを閉じ込める磁気コイル群の種類と構成ならびに各種主要機器の制御盤の外観を図 3 に示す。そしてヘリオトロン J のプラズマ実験で約 3 秒間のスパン内でプラズマ生成のために操作される各機器のオンオフのタイミングの概念図を図 4 に示す。

Major Components of composing Heliotron J system

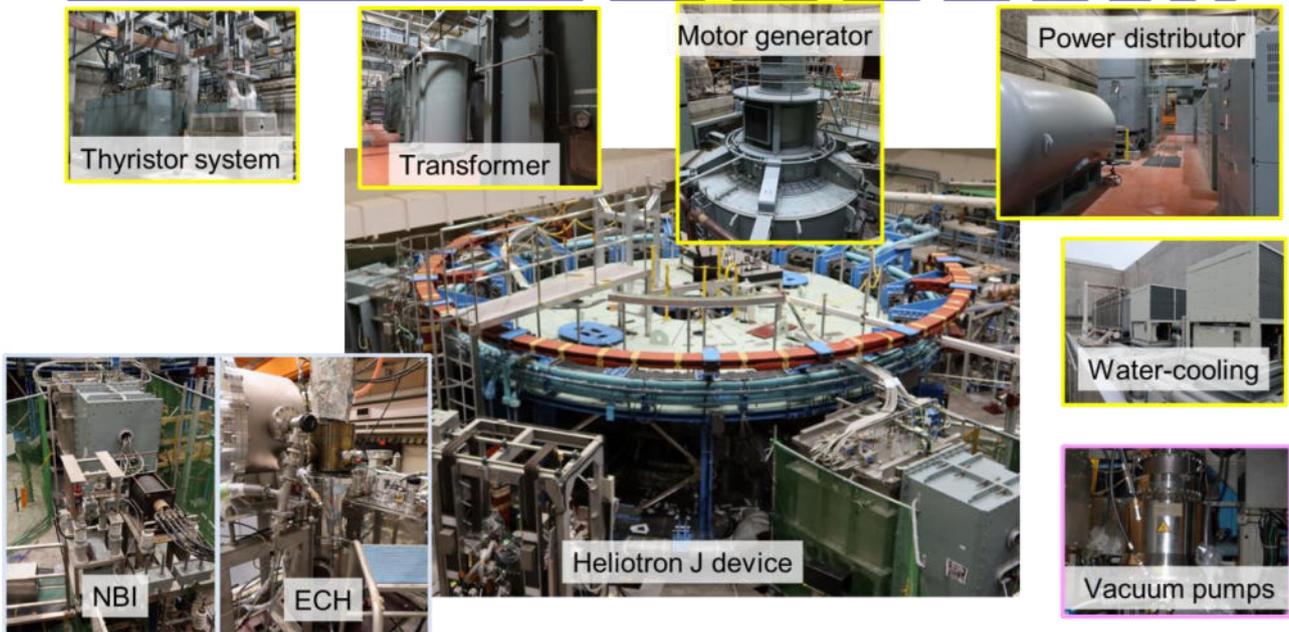


図2 ヘリオトロンJ設備を構成する主要装置

These devices have individual measurement equipment (temp, press, flow, volt, cur) and independently controlled → used as interlock signals to main control systems

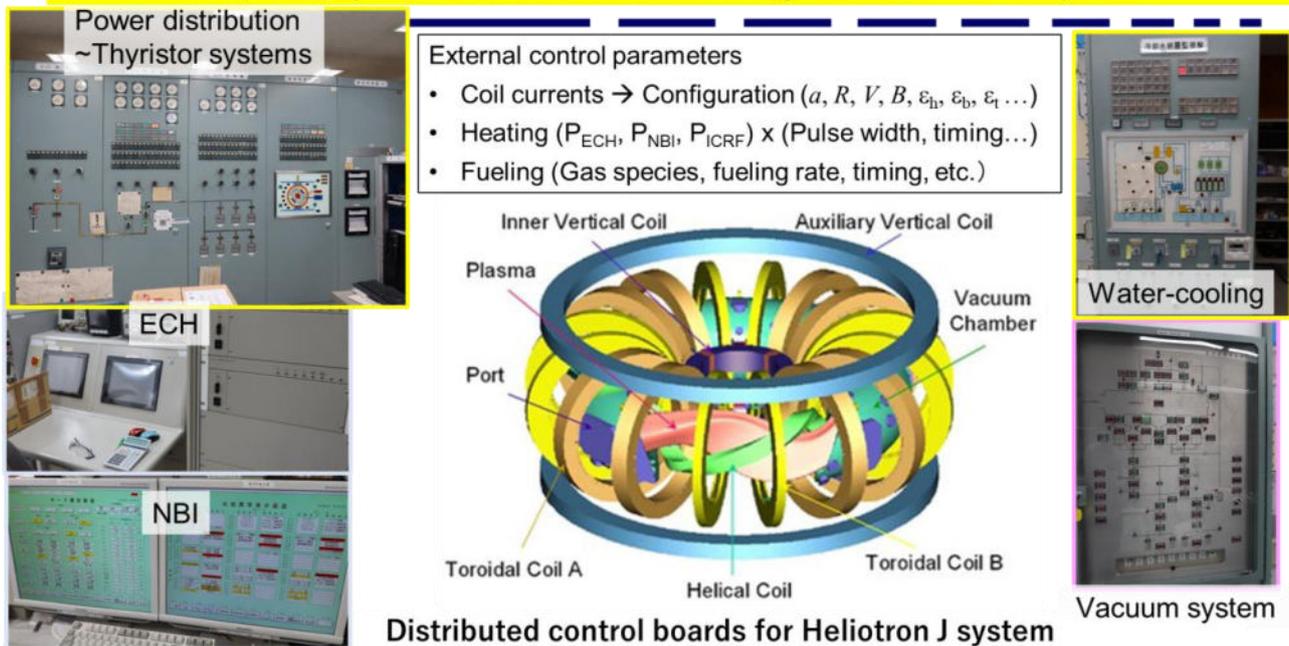


図3 ヘリオトロンJのプラズマ容器と磁場生成コイル群、制御用パラメタと分散型制御盤

Timing chart of one plasma shot (ca. 3 second)

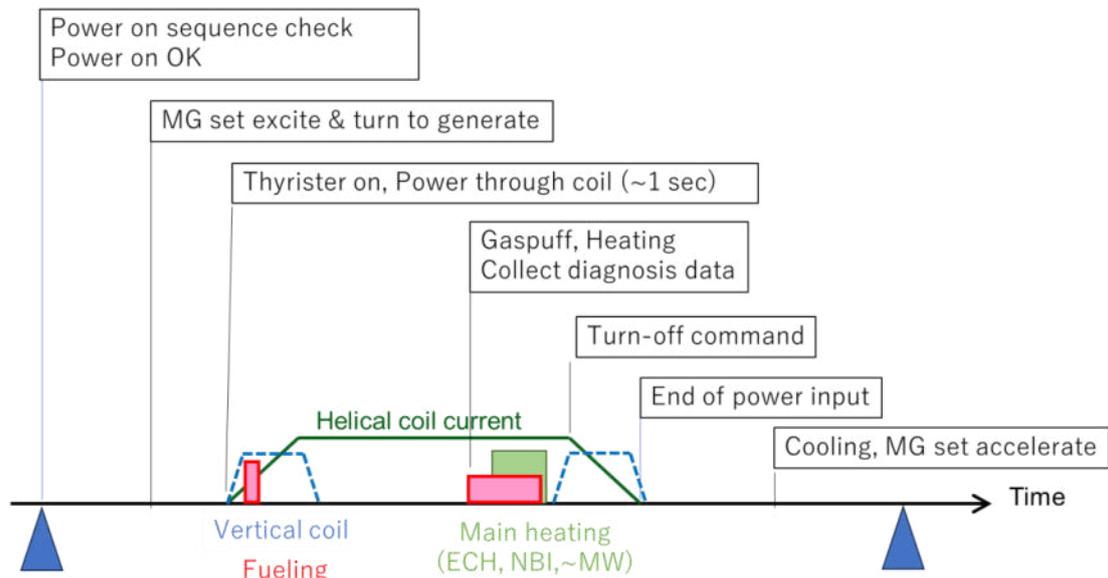


図4 プラズマ生成・冷却のタイミングチャート（約3秒間）

2023年8月30日に開催された第14回先進エネルギー科学国際シンポジウムでのZeポスターセッションではヘリオトロンJ実験設備の構成と実験手順の説明後、上記に述べた3つの研究テーマの概要と今後の研究実施予定を英文ポスターにまとめて発表した⁽⁴⁾。

さてヘリオトロンJ実験装置を対象とする個別テーマ①、②の実施では、小林進二によるプラズマ生成装置本体よりは補機系を対象にしてほしいとの提案を受けて研究が進められた。その理由はヘリオトロンJのプラズマ生成のための本体の保守はメーカーに委託され、補機系の方はエネルギー理工学研究所ヘリオトロンJ部門のスタッフが担当していて、京大側のメンテナンスにかかる事項である補機系の劣化度の診断や補機系の信頼性評価が本共同研究で提供されることはありがたいとのことであった。

その後2023年12月13日の2023年度第1回研究談話会では、上記の3つの個別テーマ①、②、③の実施結果の報告と討論とともに、核融合科学研究所六ヶ所研究センター横山雅之氏による招待講演「核融合研究におけるデータ駆動アプローチから統計数理核融合学の提案」ののち、今後の共同研究課題を討議した⁽⁵⁾。

新田純也によるテーマ①での高調波劣化診断はプラズマコイル冷却とNBI装置の水冷却系を構成する電動機群を測定対象として実施され、個々の機器の劣化度を推定するとともに、電源盤で測定する電流波形に共通して現れる傾向について考察しこれの究明を今後課題とした。

松岡猛によるテーマ②では、ヘリオトロンJ実験施設の水冷却系全体を構成する機器群についてGOLF解析に必要な解析条件を仮説的に設定し、ヘリオトロンJ実験装置の運転開始以来の現在までの経時的な運転履歴（運転前の停止と機器点検後の実験実施）に対する稼働度を評価することとし、コストを下げずとも信頼度を維持できる点検法を評価した。

一方、黒江康明によるテーマ③では既往の京都工芸繊維大学の簡易プラズマ装置を対象にした模擬プラズマシミュレーション結果を示してデータ同化をどのように導入するかアイデア提起を行った。

2. 3 2024 年の研究計画の設定

2023 年度実施の 3 テーマのうち、テーマ①、②は今後もヘリオトロン J 装置を対象に 2023 年度の結果を踏まえて研究を深化したいとする一方で、テーマ③は 2024 年度にはヘリオトロン装置を対象に今後新たに共同研究メンバーを募って本研究グループとは別途に研究計画を立てたいとの黒江の希望により取りやめることとして、2024 年度の申請においては、ヘリオトロンを対象にしたテーマ①、②の継続発展を図るとともに 2022 年度実施の研究集会で行った、システム故障や劣化診断、リスク解析による信頼度評価による安全対策やセキュリティ対策に関する AI を含めた高度 ICT 技術の研究調査と統合して、企画共同研究テーマ 3（エネルギー科学におけるデジタルトランスフォーメーション）へ発展を期すことにした。

すなわち 2024 年度の研究計画として、具体的には以下の 2 つの A と B のテーマで共同研究を進めることにした。

A. 2023 年度から継続のヘリオトロン J を対象とする実験研究

- A.1 電気機器劣化の高調波診断システムの現場設置継続実験
- A.2 GO FLOW による補機類の動的信頼性・アベイラビリティ解析の高度化

B. エネルギー科学の DX 学理進化のための高度 ICT 基盤調査

- B.1 システム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法
- B.2 AI のエネルギー産業分野への応用展望

テーマ A では、昨年度のヘリオトロン J を対象にする電気機器劣化の高調波診断システムの現場設置実験の実験解析を継続して高調波診断法の利用における新しい知見を得るとともに、補機類の劣化度データを示してヘリオトロン J の機器メンテナンス計画に資する。また、GO FLOW による補機類の動的信頼性・アベイラビリティ解析を実施してヘリオトロン J の補機類のメンテナンス計画に資する。ここでは高調波診断による機器類の劣化度診断結果を補機類の GO FLOW による動的信頼性・アベイラビリティ解析にどのように関連付けるかを考察する。

テーマ B は、2024 年度に新たに取り上げたもので、2 つのサブテーマ B.1 と B.2 に分かれている。ここでは高度 ICT 基盤に関わるシステム基礎論としてシステムの計測と診断とに関わり、機能、構造、劣化・故障事象の関連性を記述し、操作する知識ベースの構築を志向し、これをエネルギー産業分野に応用する手段として、最近進展の著しい AI の動向を調査してその活用により前述した知識ベースの実装に生かす方法を検討し、テーマ A での高調波診断と GO FLOW 解析の統合に活用することを考察する。

3. 2024 年度の共同研究の実施経過と主な研究成果

3. 1 第1回全体会議（2024年6月26日）での検討

以下には第1回全体会議で発表されたテーマAとテーマBの研究状況をまとめる。

3. 1. 1 2023年度から継続のヘリオトロンJを対象とする実験研究（テーマA）

テーマAでは、前年度に実施のヘリオトロンJ装置を対象にした高調波診断システムとGO FLOW解析法の適用研究の進展の報告があった。

3. 1. 1. 1 電気機器劣化の高調波診断システムの現場設置継続実験（A. 1）

① A. 1では、新田純也より発表があった。多岐にわたる発表内容の詳細は付録1の①([こちら](#))に示す。以下にはその要点をまとめる。

(1)高調波診断技術とは、電気設備の電源盤にてサーチコイルにより、運転状態で運転中の電源電流が測定される。測定された電源電流には基本波（商用周波数）以外に重畳する高調波成分を含んでおり、その2次から40次の高調波成分の出方の特徴から設備の劣化度を診断する方法である。これまで10年以上、1万台以上の設備での3万6千台を超える機器の劣化データを収集して行った多変量解析法の主成分分析法に基づく技術である。この方法での電源電流の測定部位と劣化を診断する部位、診断結果を出力する諸表および診断システムの構成について詳しい説明があった。

(2)次いで昨年度高調波診断システムで測定したヘリオトロンJ設備の純水冷却系ポンプとNBI装置の水循環ポンプの診断結果を示した。

(3)純水送水ポンプと冷水循環ポンプの電源電流への高調波診断の適用で、純水送水ポンプ（001）より冷水循環ポンプ（002）のほうが基本波から大きく波形が乱れていること、これより002にはより多くの高調波成分が発生していることが直感で分かる。個々の診断結果では、真空系純水送水ポンプではモータ反負荷側ベアリングに劣化があり、軸受けにグリス注入が必要である。そしてそれを行っても改善しない場合は、軸受けの交換が必要であるとした。一方、真空系冷水循環ポンプには、負荷部の軸受けに劣化兆候がある。またモータ部反負荷側ベアリングにも劣化兆候が見られる。また、002は001に比べて高調波成分の振動が大きいため、モータ電気系（巻き線）に悪影響を与えているかどうかを注意して調べる必要がある。

(4)一方、昨年度の測定ではNBI電源系設備で測定したすべての電動機の劣化度データが似ていることを不審として、今年度は個々の電動機の劣化の原因に立ち入る前に、すべての電動機の劣化度が同程度であることの原因究明を中心に長時間測定を計画したい。なお想定される原因として、①NBI電源制御盤が高調波に汚染されている可能性、②非常に強い高調波を発生している設備が系統の中に存在し、アースなどコモン等から高調波が流れ込んでいる可能性、③設備設置状況の問題、の3つの可能性を挙げた。

その後、以上の新田純也の講演内容に対して以下のような質疑と意見交換があった。

Q: NBI電源設備の劣化度データが似ているのは、4台の設備が大きな同一プレートに乗っているからではないか。

A: 似ている原因と考えられるのはPPTに記載の通り3ケースを想定しているが、そのうちの③の設置の問題」がそれに当たる。劣化により発生する高調波より、架台の振動により発生する高調波のほうが

強い場合、このような現象が発生するケースが想定される。

Q:その場合、診断は可能か？

A:架台の振動による高調波の強さにもよるが、一般的には「足し合わせの原理」で、「下駄をはいた」状態のため、傾向管理することで、ある程度は診断できる可能性がある。とはいえ「勿論のこと診断精度は下がる。

Q:外乱ノイズがある場合の診断精度についてはどうか？

A:多くの診断方法は、「ノイズに強い診断方法」と「ノイズに弱い診断方法」に分けられるが、高調波診断技術は比較的外乱ノイズに強い診断方法といえる。その理由は高調波しか見ていないからである。なお実際のところ、高調波と高調波の間に診断に有益な情報があるかもしれないが、高調波診断は割り切って、高調波しか見ていないことが、比較的ノイズに強いと言われる所以である。なお側波帯に発生する「ヒゲ」を測定する方法は、実際の製造現場ではノイズに弱い為すたれていった。

3. 1. 1. 2 GO FLOW による補機類の動的信頼性・アベイラビリティ解析の高度化 (A. 2)

A. 2では松岡 猛より以下の発表があった。(詳細は付録2の①([こちら](#))参照)

2023-2024年にわたるGO FLOWによるヘリオトロンJの水冷却系のアベイラビリティ解析の要点は次のようにまとめられる。

(1)ヘリオトロン実験施設の保有するヘリオトロンJの水冷却系の系統図から主要機器を取り出した構成図を作成すると図5、図6のようにまとめられる。

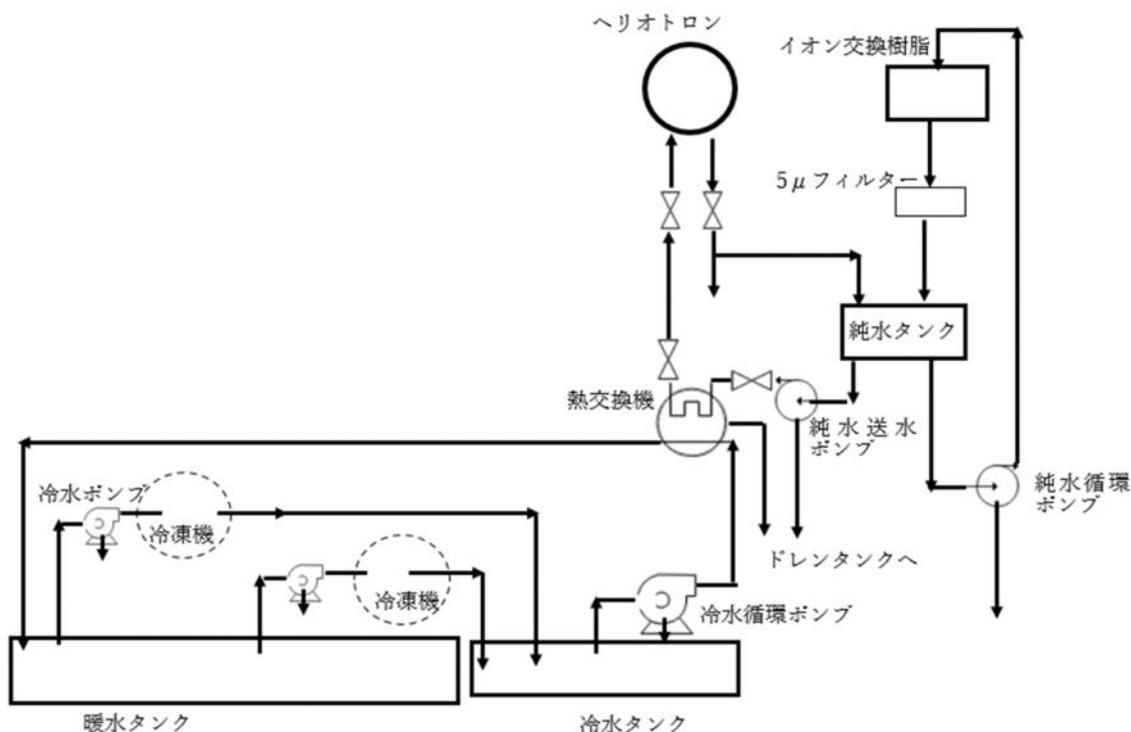


図5 水冷却系の系統図から主要機器を取り出した構成図 その1

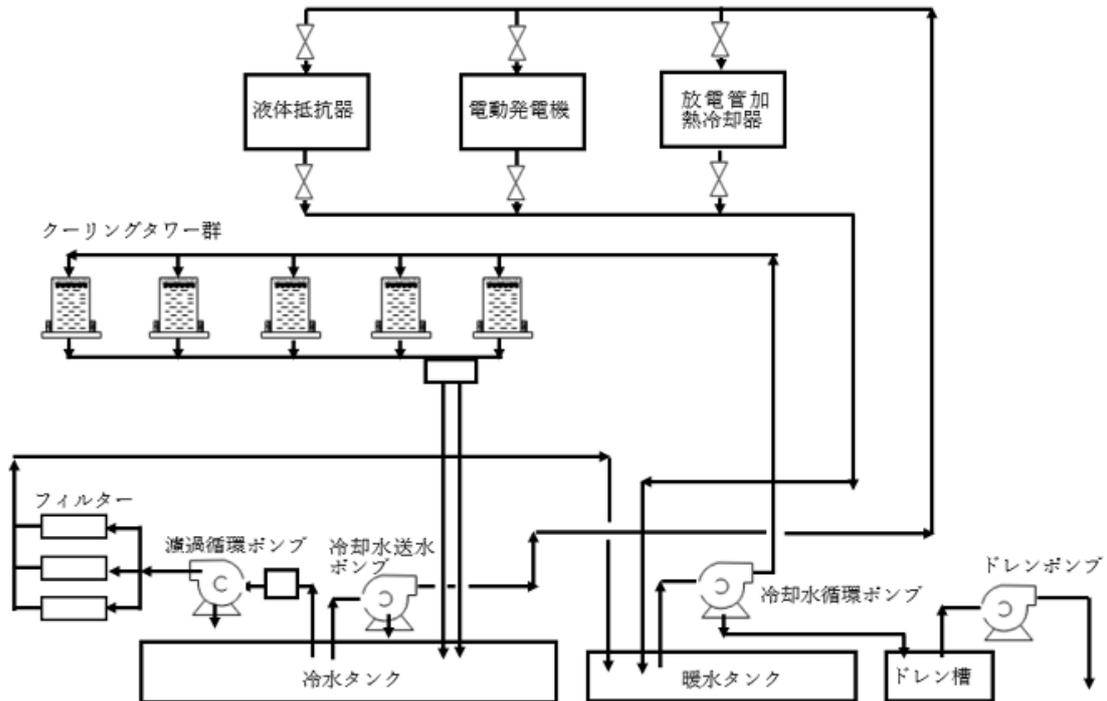


図6 水冷却系の系統図から主要機器を取り出した構成図 その2

(3)実質は1980年以來の現在までのヘリオトロンJの年間稼働率（アベイラビリティ）の変化を①ヘリオトロン本体については一年毎の完全な点検保守を実施、②ポンプ類については運転中故障に対する補修を実施、③弁・その他の静的機器については、点検保守は実施せずと仮定したベースケースとし、点検・補修条件について、次の4つのケースを想定した稼働率の変化をGO FLOWで求めた。

ケースA：放電管加熱冷却器、弁の待機中故障モード、タンクその他機器以外は毎年点検・保守を実施する。

ケースB：ケースAの条件で、ポンプ、液体抵抗器、放電管加熱冷却器、冷凍機、弁については2群にわけ、それぞれ隔年2年毎に点検・補修を実施する。

ケースC：さらに冷凍機、発電機も隔年2年毎に点検・補修を実施する。

ケースD：基本ケースにおいて、ヘリオトロン本体、クーリングタワー、フィルター以外を隔年2年毎に点検・補修を実施する。

(4)GO FLOWによる5つのケースのアベイラビリティの比較を図7に示す、

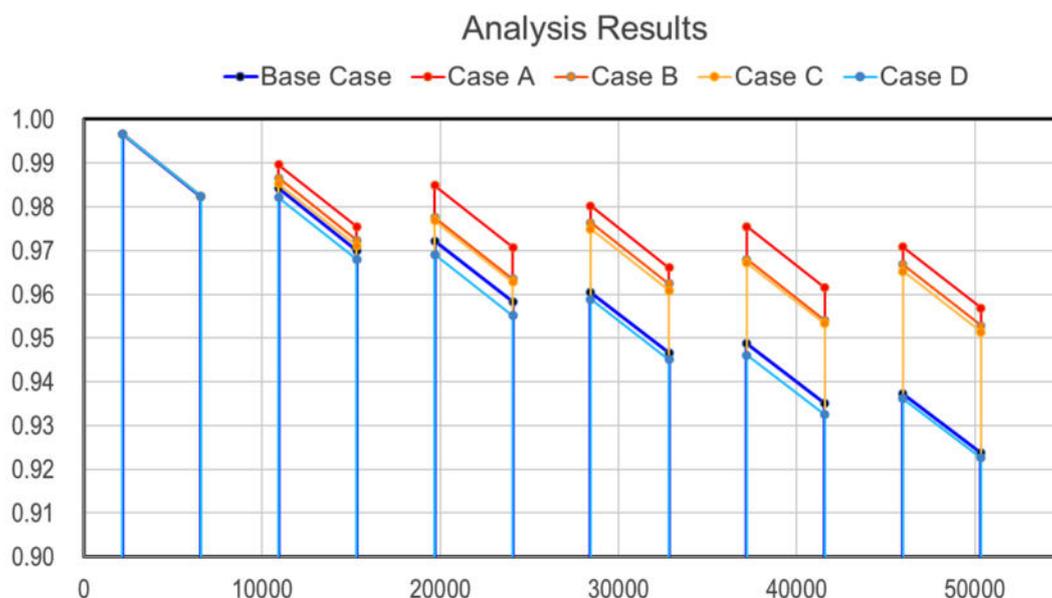


図7 アベイラビリティの推移の比較

この結果を検討して次のように要約した。

- ◆ アベイラビリティは時間経過とともに明確に減少する傾向を示している。
- ◆ 基本ケースは現実の点検・保守に近いものとした。
- ◆ ケース A ではほぼすべての機器の点検・保守を毎年実施する。当然ながら一番高いアベイラビリティを示す。
- ◆ ケース B では、ケース A において、いくつかの種類を 2 群に分けて点検・保守を隔年に実施する。アベイラビリティは低下するがケース A よりやや下がる程度である。
- ◆ ケース C ではヘリオトロン本体以外ほぼすべての機器について点検・保守を隔年に実施する。アベイラビリティはケース B とあまり変わらない。
- ◆ ケース D は、基本ケースにおいてヘリオトロン本体以外のほぼすべての機器について点検・保守を隔年に実施する。アベイラビリティは基本ケースとほぼ同じ値を示す。
- ◆ 全体を通して言えることは、ほぼすべての機器を 2 群に分けて、点検・保守を隔年で実施してもあまりアベイラビリティは低下しない。

松岡猛は、以上の解析結果をもとに下のように報告した。

(1)ヘリオトロン設備の水冷却系を構成する主要機器等の保守スケジュールを変更したときのアベイラビリティの時間変化を GO-FLOW で計算して適切な保守を検討する判断材料を提供した。

(2)具体的にはヘリオトロンでの設備の主要機器やそれ以外の機器の点検修理の実際の状況、通年の運転スケジュールの実際、過去のトラブル事態を勘案し、GO-FLOW への入力データを種々設定し、ヘリオトロン J の運転開始以降現在にいたるまでのアベイラビリティの時間履歴を求めるパラメタスタディを実施した。その結果、今後アベイラビリティを余り低下させず効率のよい保守点検方法を定めるための判断材料を提供したと考えている。

(3)昨年度のヘリオトロン解析の結果、基本的にヘリオトロン J の水冷却系のモデル化と解析体系が確定

できた。今年度は故障率等のデータの変更、さらに考慮すべき機器の付加、システム構成の変更に対処した計算や、不確定さ幅を考慮した解析、新田氏による高調波診断の結果と整合させた解析体系への発展が考えられる。

その後、松岡 猛の報告に対し以下のような質疑と意見交換があった。

C:解析内容・条件についてはほぼ良いのではないか。機器の点検・保守を隔年で実施してもアベイラビリティの低下はそれほど見られないという結論は大変興味深い。

Q: 機器の点検を実施するとかえって不具合が発生することがあるが、このことはモデルに組み込まれているのか。

A: そのような事象は良く報告されている。良好に動作している機器はできるだけ触れないでそのままにしておくのが望ましいという考えもある。点検結果の不具合の発生事象のモデル化が適切にできればGO-FLOW 解析に組み込める。

3. 1. 2 エネルギー科学のDX学理進化のための高度ICT基盤調査 (テーマB)

第1回全体会議では、B.1の『システム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法』に関連して、高橋信から発表があり、その後、質疑応答があった。

◆高橋信の発表

高橋信による発表の詳細を付録3([こちら](#))に示し、その発表の要点を以下に示す。

(1) Ze 共同研究の B.1 のテーマである「システム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法」に対し、「故障生起汎化知識による故障メカニズムの構造表現」を提起したい。異常診断に対する基本的問題として、a.センシング情報の十分性、b.オペレータ、保守要員の関与の仕方、c.異常仮説の設定の仕方、d.異常事象のリスク分析、の4つの観点を指摘したうえで、この研究の背景として高い安全性が要求されるシステムの安全性向上には、プロアクティブな対応が必要とされるとの立場で研究を進めていると強調。その観点で従来一般的に用いられている故障モード影響分析 (FMEA) では考え落としが生じうるので故障事例を一般的に汎化して記述する知識ベースとして故障生起汎化知識 (GFMK) の表現法を提案した。

(2) 「安全空気圧圧縮装置」の警報発生の原因究明に、提案する GFMK 知識ベースの考え方を適用して、概装置ではあらかじめ想定されていなかった故障メカニズムを新たに導出し、それによる種々の機能異常が生起する可能性を示した。

(3) 東北大学の制御システムセキュリティセンターでの水槽システム模擬プラントに使用されているマグネットポンプの製品取り扱い説明書・仕様書をもとに GFMK 知識ベースを適用してこれまで陽には示されていない故障メカニズムを導出し、それが及ぼすプラント機能阻害を明示化した。

(4) 六ヶ所村再処理工場廃棄物管理施設の検査室排風機遠心ファンに同様の GFMK 知識を適用して起こりうる故障メカニズムを導出した。

(5) これまでの研究では、ハードウェア故障を対象に GFMK 知識ベースから未知の故障メカニズムを導出を人手で行っているために考え落としバイアスが生じる可能性がある。これら事例に人間が関与する

場合には、技術社会システムとしての取り扱いが重要と指摘した。

◆質疑応答

その後高橋信の発表に対し以下の質疑討論があった。

Q: GFMK は有用な方法だが用いている図表の表現が込み入っていて意味するところを直観的に理解しにくい。なんらかの工夫を要するのではないか？むしろ文章で説明できるようにしたらどうか？。

A: :すべてを文章化できるがそれではますます複雑になると思う。

Q: 構造化することで故障の生起メカニズムをわかりやすくしていると思うが、安全対策についてはどこに注目するのか？萌芽的予兆に対策を打つのであれば多くなりすぎてやりすぎになってしまうように思う。

A: 故障の進展のところで示したように設計段階で予期しなかった故障を見つけられたというところにこの方法の価値がある。

また長年の研究で故障事例を GFMK で構造化しておき、それをもとに教科書の知識や製品の設計仕様書を分析するところを AI 化するのはいかかとのコメントに対して、高橋信より Chat GPT の適用ではもともと生成 AI の持つ知識ベースにプラスアルファとして自分の知識ベースを足して推論の精度を向上させるという有料の機能には問題があるとの感想が披歴された。それは自分の知識ベースを生成 AI のサービス提供者にオープンにしてしまうことで、自分の知識を公益に提供するという意味ではよいかもしれないが、製品メーカーの立場からすれば商業秘密を維持できないという恐れが生じる点である。

その他、生成 AI を原発の安全規制活動に採用されることと、AI による車の自動運転の規制問題について製品（原発や車）を提供する側に立てば法的責任問題から難しい問題の所在の議論の交換があった。

◆研究代表者による故障生起汎化知識（GFMK）の考察—その1

高橋信の講演で提起の故障生起汎化知識（GFMK）は、後の議論で頻りに引用されるので付録Ⅲ中の GFMK を研究代表者（吉川榮和）により若干変更して図8に示す。図8では、萌芽事象および発現事象に与える影響属性（事象の生起ないし遷移条件）は共通の背景要因として1つにまとめた。

高橋信による3つの事例研究（安全空気圧圧縮装置」の警報発生の原因究明、東北大の制御システムセキュリティセンターでの水槽システム模擬プラントに使用されているマグネットポンプの製品取り扱い説明書・仕様書、および六ヶ所村再処理工場廃棄物管理施設の検査室排風機遠心ファン）の紹介では、それぞれ GFMK 知識をどのように異なった目的に活用するのかの操作手順を示している。そこではさらに、図8の右側の高橋信による故障生起汎化知識（GFMK）と、左側の施設固有情報に関わる機能異常との関係をどのように考えるかもさらに第2回全体会議のところで検討する。

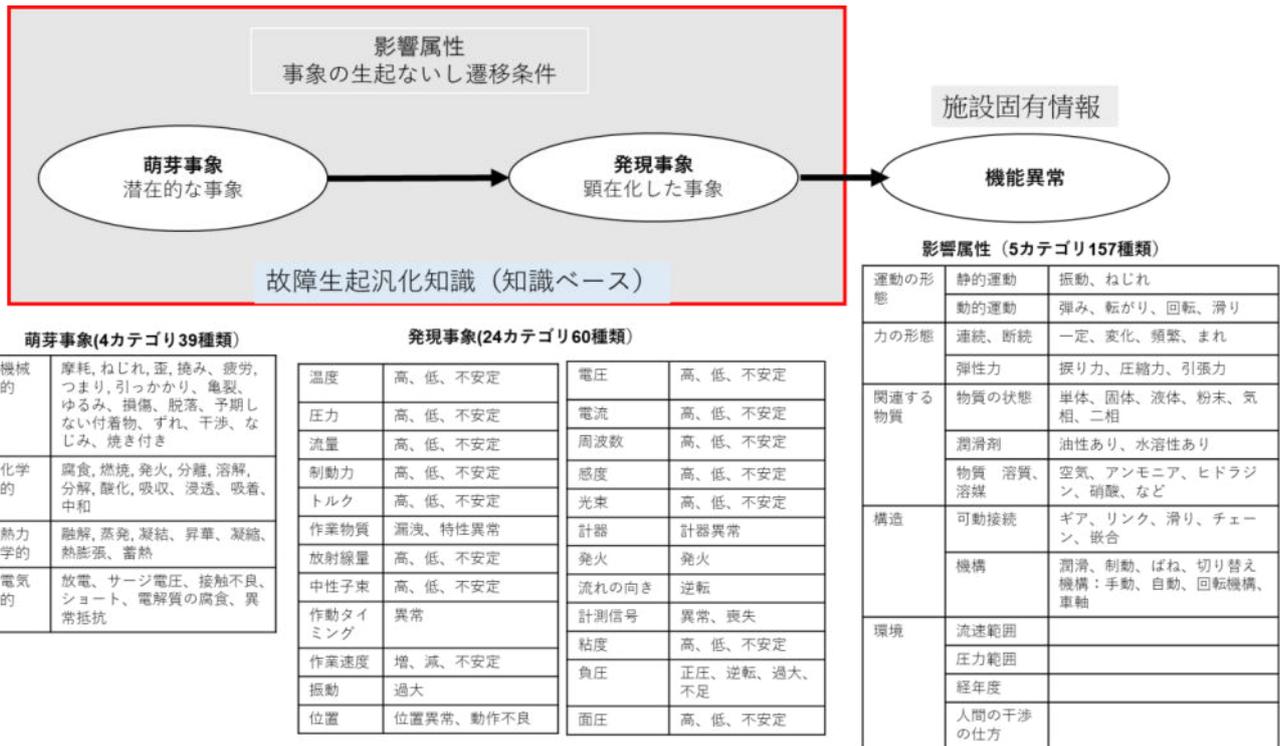


図8 故障生起汎化知識のポイント

3. 2 第2回全体会議 (2024年10月29日) での検討

2024年12月10日に京大宇治キャンパス黄檗プラザで開催の第15回先進エネルギー科学国際シンポジウムでのZeポスターセッションに発表するポスターをどのように編集するかの方針の相談するため、第2回全体会議を行った。そこではまずテーマAとテーマBのメンバーからその時点までのそれぞれの研究成果が発表された。

3. 2. 1 2023年度から継続のヘリオトロンJを対象とする実験研究 (テーマA)

当日は、2024年度のヘリオトロンJ実験施設の運転開始が12月以降にずれのためにヘリオトロンJを対象にした実験と解析の実施は年度内には困難との予想のもとに、テーマAで個々に実施した結果が報告された。

3. 2. 1. 1 電気機器劣化の高調波診断システムの現場設置継続実験 (A. 1)

今年度のヘリオトロンJ施設の実験開始は12月以降になるため今年の高調波診断システムを設置しての測定実験はそれ以降になる。その時の測定対象機器と高調波診断システムによるデータ解析の力点をどこに置くか、の観点から新田純也は高調波診断システムのヘリオトロンJへの適用結果を発表した。(詳細は付録1②(こちら)参照)

新田純也は、昨年度測定したデータのうちとくにNB I電源冷却系を構成するポンプ類に対する高調波診断システムで求めたストレス度、劣化度の診断結果を示し、それぞれの機器の劣化傾向と取るべき対策を述べるとともに、各設備のストレス診断結果が似すぎている傾向についてその考えられる原因を論じた。

また、新田純也は、高調波診断技術の知見の一つとして、電気系部位の劣化は奇数次が支配的であり、機械系部位の劣化は偶数次が支配的である。この理由は、機械的部材（軸・軸受け等）の劣化は振動を伴い、そのため、エアギャップの回転磁界が歪み（非対称となり）、その結果、元々殆ど無かった偶数次高調波が立ってくる、と説明した。

3. 2. 1. 2 GO FLOW による補機類の動的信頼性・アベイラビリティ解析の高度化(A. 2)

動的信頼性解析GO-FLOWのヘリオトロンJへの適用結果について、松岡猛はGO-FLOWの解析結果を保守点検計画の策定に資する事を目的に、ヘリオトロンJの運転に重要な役割を果たしている水冷却系の信頼性／アベイラビリティ解析をGO-FLOW解析法により実施したこと、水冷却系の主要な機器であるポンプ等の保守スケジュールを変更した時のアベイラビリティの時間履歴を算出し、適切な保守方法を検討した結果を報告した（付録2の②([こちら](#))参照)。そしてその内容は本年10月に仙台にて開催のPSAM17&ASRAM2024で発表したことを紹介した。⁽⁶⁾

松岡猛は、ヘリオトロンJの運転実績と実際に行われてきた保守点検の実際からの機器故障率の推定、保守点検スケジュールについての5ケースのパラメータ解析から稼働率を下げずにコストを改善できる保守法を提案するとともに、高調波診断システム結果の活用、GO-FLOW解析における保守の効果のモデル化、今後のより実際に即した解析条件の設定について考察し、各機器の保守・点検を精査する、個別機器毎に保守・点検条件を設定する、弁の考慮範囲をどこまで広げるべきか、故障率の設定の仕方といった課題を列挙した。

最後に松岡猛は、今後の解析へ向けて以下のように述べた。

- ① GO-FLOW チャートへのモデル化・解析体系ができていますので、保守・点検条件を変更した他のケースの解析も容易に実施できる。
- ② 今回設定した故障率も容易に変更できる。
- ③ 考慮必要な機器の付加、システム構成の変更等の解析も既存GO-FLOWチャートの変更で容易に対応可能。
- ④ GO-FLOW解析と高調波診断システムとを組み合わせた高度な解析体系の開発が期待できる。
- ⑤ 不確実さ幅を考慮した解析を実施し点検・保守計画の設定の判断材料としたい。

3. 2. 2 エネルギー科学のDX学理進化のための高度ICT基盤調査 (テーマB)

3. 2. 2. 1 システム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法 (B.1)

システム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法については、3.2.1に述べた高橋信による故障生起汎化知識(GFMK)の表現法の提起を背景にして、機能の概念と機能モデルに基づく運転支援と、保全学研究者から故障生起汎化モデルへの提言の2件の考察結果が発表された。

まず機能の概念と機能モデルに基づく運転支援と題して五福明夫から話題提供があった。(詳細は付録4([こちら](#))参照)

研究の背景としてプラント安全運転への運転員に要請されるタスクの機能面から考察。研究目標としての不測の事態における運転員の対応操作支援に資する機能モデルとして代表的な概念を紹介。MFMと機能モデルに基づく想定外異常時の対応操作手順生成手法の概要とその例題、手法の限界と対応方針、

物理リソースを考慮した対応操作手順選択手法を紹介し、機能モデルの DX 学理化への貢献可能性を論じた。そして次のように結論した。

- ① 機能モデルは、システムの機能と目標や構造との関係性と機能間の関係の階層性を表現する（デジタル的に表現）
- ② 設計情報の保存とコンピュータによる推論により、異常診断、可能な対応操作の導出、リスクアセスメントなどへの応用が可能
- ③ DX 学理化への可能な貢献として DX システムの基盤 となる。具体的に AI やロボットと組合せて異常状態も含めた運 DX システムや、システム構成変更時の自動リスクアセスメントシステム、人間とコンピュータとの対話システムの基盤を提供する。

次いで保全学研究者から故障生起汎化モデルへの提言とコメントと題して森下和功、安倍正高、高橋信から話題提供があった

森下和功は『照射脆化予測と RPV の劣化管理』と題し、“故障生起汎化知識”と Unknowns、压力容器の照射脆化、脆化予測の方法論。Unknown-unknowns の予測について話題を提供した。（詳細は付録5（[こちら](#)）参照）。

森下和功は、認識度が known か unknown か、理解度が known か unknown か、の認識度 vs 理解度の 2 軸平面において双方とも Unknown の場合の unknown をどのように予測するのか？について照射劣化管理を例にして紹介すると述べた。そして異常診断に関する基本的認識を表 1 を用いて説明した。

表 1 異常診断に関する基本的考え方

センシング情報の十分度	既存の計測情報だけで十分か？
	追加の計測（監視）情報の必要性
オペレータ、保守要員の関与	全自動の診断システム
	人間と対話的にインタラクションする診断システム
	人間に対しての情報提示の方法
異常仮説の設定	これまで経験した異常に関しては事例ベースで対応
	これまで未経験の事象の発生の可能性をどう考えるか？
	システム的设计情報に基づく異常生起の可能性評価
異常事象のリスク分析	複数の異常仮説がある場合、結果としてのリスク（ダメージ）に応じて対処策の優先順位を考える必要がある

高安全性が要求されるシステムにおける安全性向上の方法について表 2 を示し、トラブルの影響が大きいシステムには、プロアクティブな安全性向上策が求められることを強調した。

表 2 高安全性が要求されるシステムにおける安全性向上の方法

過去のトラブル事例を参考にした再発防止策	トラブル事例の水平展開
	設計への反映
	後追いつ的な対策
プロアクティブな安全性向上策	トラブル事例への予測的対応
	故障モードの推定

その後、森下和功は、高橋信提唱の故障生起汎化モデルの目的とモデル概念を概説ののち、原発の高経年化対策として機器・構造物の健全性・信頼性を維持するために、経年劣化事象を正しく評価（状態把握、予測、修復）する必要があるとして圧力容器の中性子照射脆化評価問題への森下研究室の取り組んでいる研究課題を引用して、マイクロからマクロにまたがるマルチレベルの具体的知識ベースの実相を紹介した。

次いで安倍正高は経年劣化事象を正しく評価（状態把握、予測、修復）する故障生起汎化モデルを、逆に劣化や破損を起こさないようにどのように設備設計や運転手順の設計に用いるかという機能構成の設計法の研究があるのでないかと問題提起した。

最後に高橋信から故障の実例を集めてそれぞれを分析した結果から提起した故障生起汎化モデルに一般化できるというアプローチを提唱したもので、森下和功と安倍正高の提唱した2つの観点は自分の研究に新たな視座を提供するものとコメントした。

◆研究代表者による故障生起汎化知識（GFMK）の考察—その2

第2回全体会議のテーマB.1に対する発表と討論で提起された問題には次の3点があった。

- ① 五福明夫による機能モデルとMFMMの話提供は、高橋信の故障生起汎化モデル（GFMK）の図8においてGFMKの赤枠外の右側の施設固有情報と機能異常、そして発現事象と機能異常の間の矢印をどのように考えるのか、についての手掛かりを与えるものであった。
- ② 森下和功による照射脆化予測とRPVの劣化管理に関する話題提起は、金属材料における放射線照射に伴う材料のマイクロ構造がどのような現象で材料のマクロ構造に変異をもたらすかを記述する数学モデルとそのシミュレーション計算を、どのように高橋信のGFMKと施設固有の機能異常に関連づけるのかを考察する出発点になるものであった。
- ③ 安倍正高によるGFMKを逆に使ってどのように破損や故障を避けるように設備や施設を設計するのか、あるいは運転管理法を考えることができるという提案では、図8でいえば萌芽事象から発現事象、さらには発現事象が機能異常をもたらすという『事象繊維の閾値』の記述を図8のフレームに適宜加えるべきことが指摘される。

以上のような議論は、電気機器の高調波診断システムで劣化診断の対象としている機器と部位、劣化の状態と程度について、GFMKフレームで考えることにも通じるものである。

3. 2. 2. 2 AIのエネルギー産業分野への応用展望（B. 2）

AIのエネルギー産業分野への応用展望について、『大規模言語モデルLLMの解説と応用の展望』と題して出町は、付録6（[こちら](#)）をもとに、以下の順に総合的な講演を行った。

(1) 深層学習モデル(AIモデル)は、一般に表3のように分類され、応用されている。

表 3 深層学習モデル (AI モデル) の種類と応用

識別系	誤字・脱字、コンクリート強度、画像認識、音声認識、計器の自動読み取り
予測系	故障予測、気象予測、株価予測、需要変動予測、最適条件選定、等
制御系	プラントの自立制御、乗用車の自動運転、ドローン自立飛行、アクロバットロボット、等
生成系	テキスト生成、画像・動画生成、音楽生成、カスタマーサポート、等

(2)出町研究室では複数 AI の組合せで表 4 のように 8 つの原子力用の AI 開発に取り組んでいる。

表 4 出町研究室における原子力用 AI 開発の目的、開発モデルとその概要

目的	開発モデル	概要
原子力安全・保全	機器・プラントの故障検知	注意機構搭載の深層学習モデルによりプラントに多数設置された監視センサ信号から異常(故障)を予兆の段階で検知し、故障機器等を同定。
	④プラントのサロゲート DL と異常時対策 RL	プラントシミュレータの入出力データを教師データとして学習し、未来のウランとデータを高速計算。軽微な異常への対応に有効な回復操作を強化学習で予測。
	仮想空間中の保全 PDCA サイクル	仮想空間での物理現象を原子力デジタルツインで、仮想空間の人間活動を保全 PDCA サイクルで再現。両者をオンラインメンテナンス OLM でつなぐ。
核セキュリティ	監視カメラ画像内の悪意行為検知	監視カメラ動画内の人物の動きと所持物などを識別。識別結果を生成 AI に入力して文またはグラフ構造として出力し、悪意の有無を判定。
	BDBT 時シナリオ抽出	「想定外」の攻撃を想定するため、マルチエージェントモデルでエージェントに固有名詞と性能上限を設けず、攻撃コストの最小化のみでシナリオ抽出。
作業安全	作業支援情報提供	現在の手元撮影作業を識別し生成 AI でグラフ構造化。過去の熟練者動画グラフと比較し類似する熟練者動画やルール文などを選別。(スマートグラスに投影)
	廃炉プラント 3D 点群データの CAD 化	プラント内の 3 次元点群データから機器・配管などを物体認識し、点群欠損を補完したのち、CAD データに変換。2 次元スライス手法に改良中。
放射線医療	2D 腫瘍動画の 3D 動画へのリアルタイム変換と未来予測	治療前に撮影した肺腫瘍の 3 次元 CT 動画と治療中に得られる 2 次元 MRI 動画から、治療中に数秒先の 3 次元 MRI 動画をリアルタイムで予測し描画。放射線治療中に 2 次元 MRI を撮影できる MRIdian 装置を対象。

(3)大規模言語モデル(LLM)とはユーザからの指示を受けて、その指示に対応するテキストや画像、動画や音楽などを出力する AI であり、自然言語処理 (NLP) との違いは、NLP は、コンピュータに人間

の言語を理解・処理させる技術であり、LLM は NLP 技術を用いて、テキストを生成する。具体的には、LLM は大量のテキストデータから文の構造や文脈を学習し、文章の生成や質問への回答といったタスク処理を行う AI モデルである。

(4)プロンプトエンジニアリングとは、LLM の自然言語処理を効率的に使用するために、人工知能モデルが解釈・理解できるように命令（プロンプト）を構造化・最適化する、比較的新しい学問分野であり、最適なプロンプトとはかくあるべき、というような方法論はまだなく、タスクごとに「ベストプラクティス」を集めて検討する段階。

(5)RAG(Retrieval-Augmented Generation:検索拡張生成)とは、LLM が回答を生成する前段階に、最新の情報や専門分野のデータベースなどの外部情報を付与する機能である。

その情報検索機能として外部データベースから関連性の高い情報を検索するもので、参照すべき情報を直接与えずとも信頼性の高い回答を得られることが長所である。

(6)階層構造エージェントグループモデルの提案—原発の保全業務では極めて多種の大量の文書をもとに業務が回っている。しかし、その大量の文書を処理可能な LLM はまだないので、保全業務が階層構造の人的組織の階層的分担によって仕事が進められる実態に着目して表 5 のようなエージェントによる本モデルを導出した。

表 5 エージェントの種類とその分担業務

エージェント名	分担業務
Leader agent	・ タスクを論理的に推論しステップに分割 ・ エージェント間コミュニケーションとタスク調整 ・ エージェントの回答を結合、出力
Worker agent	・ Leader の指示に基づき 回答を生成・修正
Expert agent:	・ RAG で外部の関連情報を検索&収集 ・ 必要な外部情報を Leader に提供

これによって最大のボトルネック＝文書生成作業の短縮 → 定検期間短縮化 → 労務負担軽減化につながる。

(7)ここで大規模言語モデル(LLM)の要衝である Transformer の理論的解説があった。最初に、Transformer とはどのようなものを基本的に和→英翻訳の Transformer の構造とアルゴリズムを例にして説明された。つまり翻訳の本質は「学習」＝入力文と正解の翻訳文の大量の データセットをもとにするもので、そのポイントは、次の出現単語を正しく予測 するためにどこに着目すべきかを注意機構で学習することである。そのための多岐にわたる以下の各部分における確率的なベクトル処理アルゴリズムの説明があった。

- ・ Transformer
- ・ Encoder, Decoder

- ・トークン埋め込み(Token Embedding)
- ・位置埋め込み(Position Embedding)
- ・自己注意機構
- ・マルチヘッド注意機構
- ・加算・層正規化
- ・フィードフォワード層
- ・交差注意機構
- ・残差結合
- ・トークン出力分布の計算
- ・注意機構のマスク処理

(8)最後に LLM は原子力保全のあらゆる活動に適用できるポテンシャルを持つ。そのモデル・手法のプロトタイプを本研究で確立するとして、表 6 のようなスパンへの LLM の展開を展望して講演を終えた。

表 6 LLM の原子力保全の適用における対象のリストアップ

経営戦略	事業戦略
計画	製品構造化、保全対象、故障モード解析、保全方式、保全計画
実行	工程計画、手配（作業・物品）、作業指示（点検・改修）、点検、改修（交換・補修）、検査（記録・実績）、試運転
運転	状態監視、運転実績

3. 2. 3 Ze 国際シンポジウムでのポスター発表への対応

第 2 回全体会議では、以上の発表を踏まえて 12 月 10 日の Ze 国際シンポジウムでのポスター発表への対応について最後に検討した。その結果、具体的なポスターの構成と作製の分担は、本共同研究グループの課題である「複雑なエネルギーシステム運用保守のための先進的情報基盤の高度化」の趣旨からみて、AI の産業分野への応用の展望は AI の一般的な動向調査結果であり、本共同研究グループとしての独自性のある内容でないことから除外し、本共同研究のテーマ A とテーマ B の連携による新規性の焦点を当てたい、との研究代表者の意向から、①高調波診断システム（新田純也）、②GO-FLOW 解析（松岡猛）、③機能モデル・MFM（五福明夫）、④故障生起汎化モデル関連（森下和功・安倍正高・高橋信）、の 4 つのサブテーマについて、その方法とエネ理工研設備への実験的適用、生成 AI との関わりの 3 要素をそれぞれを PPT 4 頁でまとめてもらい、それをもとにポスターの全体構成を研究代表者が構想してから至急各メンバーに分担作業を連絡することとした。

3. 3 第 15 回先進エネルギー科学国際シンポジウムでの Ze ポスターセッションでの英文ポスター発表

第 15 回先進エネルギー科学国際シンポジウムでの 2024 年 12 月 11 日の Ze ポスターセッションでの英文ポスター発表に備えて各分担から提供されたそれぞれ 4 枚の PPT シートをもとに研究代表者にて大型ポスターに編成するために 18 頁の PPT に統合し、これを森下研研究員 Chen Yuting によりレイ

アウトして1枚の大型ポスターを印刷作成し、12月11日午後のZeポスターセッションには、松岡猛、森下和功、五福明夫、安倍正高、吉川栄和が出席して発表した。

(作成したポスターの詳細については付録7([こちら](#))参照)

3. 4第3回全体会議(2024年12月27日)とその後の検討

第3回全体会議は、もともとはZe国際シンポでのポスターセッションでの本年度共同研究の発表から令和7年1月17日が締め切りの令和17年度にどのような方向で申請を出すのかを議論する場だった。そこでは(α)高調波診断システムによる劣化診断とGO-FLOWによる信頼度解析とをどのように関連づけるのか?(β)テーマAを、どのようにテーマBに結びつけるのか?という問題の一方で、(γ)新田純也が関心を持っている電気機器の高調波による劣化診断システムにどのようにAIを取り込むのか、(δ)高橋信による故障生起汎化知識(GFMK)の表現法へ、五福明夫による機能の概念と機能モデルに基づく運転支援と、森下和功、安倍正高から故障生起汎化モデルへの提言をどのように関連づけてシステム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法の方面で新たな知的基盤の開拓を目指すのか、という問題意識、さらには(ε)世界的に展開し、機能の進展が著しいChat GPTを本研究の実施にどのように活用できるのか、という関心もあった。

しかし12月27日に実施された第3回全体会議では、研究代表者の急病による欠席の為に令和7年度の申請計画はとくに議論されず、当日は、まず上記の問題意識のうちの(α)と(γ)の問題について新田純也と松岡猛により発表と討論が行われた。

新田純也は、『高調波診断システムの方法論の解説とAI応用の可能性』と題して高調波診断システムとその高調波診断技術の原理と特徴、ヘリオトロンJへの適用結果の概説ののち、電気設備の高調波診断システムへの生成AI導入については現状の「高調波含有率」+「寄与率表」ではなくFFT波形そのものを画像として学習し、設備の状態を診断することを挙げた。そして最後に以下のように締めくくった。(詳細は付録Iの③([こちら](#))参照)

- ① 高調診断技術は、診断対象設備のどの部位がどの程度劣化しているかを診断する技術である。
- ② 事後保全や計画保全の様に診断対象設備を全部取り替えるのではなく、診断対象設備の特定部位を適切な時期に適切に保全(清掃したり部品を取り換えたり修理)することで、その設備全体の使用寿命を延長することを目指している。
- ③ そのためには特定部位(例えばモータのベアリング)を新品に交換した場合、その設備の劣化程度がどの程度改善されたかを評価するプロセスが必要になると考える。
- ④ 現在のGO FLOWの考え方は、設備を新品に交換することが前提になっているのではないか?

上記の新田純也の議論に対し、松岡猛は高調波診断の結果の動的信頼度評価GO-FLOW解析への反映方法について次のように述べた。

- ① 高調波診断技術により電気機器・設備の劣化箇所・劣化度合い等の状態監視を行える。
- ② そこでは既にNBI室の純水循環ポンプ、純水送水ポンプ等、計7台の電気設備に関して高調波診断

を実施し、劣化度（%表示）を測定し、定量的な評価が可能であることが示されている。

- ③ そのように定量評価された劣化度に対応して、個別機器の故障率を更新し GO-FLOW 解析へどのように反映させるかを検討する。
- ④ 実際に機器を修理・新品へ取り換える前の状態に対しても、劣化状態を GO-FLOW 解析へ反映でき、現実的な評価が可能となる
- ⑤ 劣化度に対応した故障率等の設定方法としては、パラメトリックな考え方、経過時間付加方法、故障率一定の指数的な分布を変更する、化度を残存寿命に置き換え、それを故障率へ換算が考えられる。
- ⑥ 現状の解析では修理後、機器は新品と設定しているが、修理後の機器の状態も劣化度の評価と同様な方法で評価し、必ずしも新品にならないとする方法を導入する。

次いで残った問題意識のうちの（ε）について松岡猛による ChatGPT の GO FLOW 実施への適用経験の結果が報告された。そこでは特定の解析対象を取り上げ（加圧水型原子炉の非常用給水系）のアベイラビリティ解析実施に、ChatGPT の有料版 PLUS+を実際に用いた結果の知見として以下のように述べた。（詳細は付録 2 の③([こちら](#))参照)

- ◆ ネット上の情報はかなり漏れなく収集する。
- ◆ 信頼性ブロックダイアグラム、GO-FLOW チャートの様な概念図の作成は無理。
- ◆ GO-FLOW オペレータを組み合わせて図を新たに作ることは困難。
- ◆ 式の作成、計算の実施、解析結果のグラフ描画は比較的良くできる。
- ◆ 質疑応答からの印象では、内容の理解(本質的理解) はできていない様である。
- ◆ やり取りの過程で得た、話題としている対象に関する前提を保持している
- ◆ 段階を追って丁寧に指示を出すと正しく反応する。
- ◆ 一度、それなりの結果を得てしまうと、修正指示を出しても実質的に変更しない。
- ◆ 出された結果(数値結果を含む) には誤りが含まれているので、丁寧にチェックする必要がある。
- ◆ 情報収集には役立つ。しかし、全てを信用するわけにはいかないの、それらを足掛かりにした確認作業が必要。
- ◆ ChatGPT の回答は参考として活用する方針として、得たい情報を引き出す方法を工夫する必要がある。

令和 7 年度の申請方針については、研究代表者はその 1 月 11 日の退院後 Ze 拠点への世話人森下和功氏に連絡して令和 7 年度の申請では、①電気機器の高調波診断システムによる機器の劣化診断結果を GO FLOW 解析法に取り込んで複雑なエネルギーシステムの運転や保守のための高度知的基盤法として研究を発展させる一方で、②高橋信提唱の故障生起汎化知識（GFMK）の表現を参考にして、①システムの機能モデリング法である MFM での機能と構造のとらえ方や人間とのインタラクションや制御の表現を取り込む方法の検討、②GFMK への電気機器の高調波診断による機器の部位劣化診断機能の組み込み、③GFMK への原子炉圧力容器の中性子照射脆化評価問題への森下研究室の取り組んでいる研究課題であるマイクロからマクロにまたがるマルチレベルの具体的知識ベースの実相の表現への

拡張の検討、④故障生起汎化モデルを逆に用いて劣化や破損を起こさないようにどのように設備設計や運転手順の設計に用いるかという機能構成の設計法の研究に展開する等の検討を進めて、システムの運転や保守のための多様な用途の知的基盤法を開拓する方向を提案するとともに、1月17日締め切りの令和7年度申請に間に合わせるために、松岡猛を研究代表者として申請書の取り纏めを依頼した。

4. 結論と今後の展望

3章に述べた本年度の共同研究で得られた成果を、それぞれの項目について改めて研究代表者の視点も交えて要約すると、次のようにまとめられる。

A. 2023年度から継続のヘリオトロンJを対象とする実験研究

A.1 電気機器劣化の高調波診断システムの現場設置継続実験

アルカディア社開発の『電気機器劣化の高調波診断システム』をヘリオトロンJの水冷却系機器群に適用して機器の劣化度を診断した結果をヘリオトロンJ側に提供した。その現場実験で得たいくつかの機器の電源電極で、サーチコイルで計測した電源電流の高調波成分に共通に出現する成分が機器の設置の仕方や周辺からの雑音の影響などどのような共通原因で生じているのかを解明できると機器の劣化状態の診断以外にもシステムが用途を見出すことができる。また電流の原波形の高調波成分以外に、原波形ないしFFT変換した波形を診断の原波形にすることにより、現在の主成分分析による線形判別法をニューラルネットに置き換えるなどによって診断の精度も向上できる可能性があることを見出した。

A.2 GO FLOWによる補機類の動的信頼性・アベイラビリティ解析の高度化

ヘリオトロンJ設備の運転開始以来の現在までの20年以上にわたる運転とメンテナンスによる休止期の履歴に対して水冷却系全体のアベイラビリティの遷移をGO-FLOWで評価できる解析条件を構築したうえで、機器類の保守の実際履歴でのベース評価と、機器保守の条件をいくつか変更したケースでの評価を行った。これにより今後アベイラビリティを低下させずに保守コストを軽減できることを示した。また、機器の劣化度を診断する高調波診断システムの劣化評価結果を取り込んだGO FLOW解析の計算スキームを検討することにより状態監視保全への可能性を指摘した。さらにGO FLOW解析の実施にChatGPTを実際使用して、ChatGPTをGO FLOW解析に利用する場合の限界や利点などを評価した。

B. エネルギー科学のDX学理進化のための高度ICT基盤調査

B.1 システム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法

高橋信の「故障生起汎化知識による故障メカニズムの構造表現」(GFMK)の提起に触発されて、実際の人工物の機器設備の故障についてのGFMKそのものの内部表現と、機器異常を機能面からの知識表現する機能モデルやその記述法であるMFM(マルチレベルフローモデル)とのインタラクションの仕方の記述の仕方とその全体をシステムの設計や操作手順などの合成問題への活用法、さらには容器の構

造的な腐食現象のマクロからマイクロにわたる現象の発展の計測とシミュレーションの GFMK への取り組みや、高調波診断システムで仮定する電気機器の劣化事象・部位の GFMK による表現などは、テーマ A とも関連する B.1 の『システム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法の発展課題』であることを提起した。

B.2 AI のエネルギー産業分野への応用展望

出町和之による最近進展の著しい Chat GPT にかかわる最近の AI の全体的な解説と同研究室における原子力保全分野における AI 応用研究の展望は、共同研究の参加メンバーを啓発する有用なものであった。今後の研究の展開において個々のテーマで、Chat GPT をどのように応用をすべきか参考になった。

以上、本年度の共同研究実施により、複雑なエネルギーシステム運用保守のための先進的情報基盤高度化のため、機器劣化診断機能の GO-FOW による動的信頼性・アベイラビリティの統計的解析実施との知的統合と連携高度化を図る手がかりが得られた。また本論文中に述べた研究代表者の考察を参考にして故障生起汎化知識 (GFMK) のモデル拡張と応用法の高度化を期待したい。なお電気機器の劣化診断を行う高調波診断システムが行っている統計処理や数値モデルの詳細がブラックボックスでは GO-FLOW との知的統合も実施不能である。そのために 2025 年度には、アルカディアシステム社の知的資産である高調波診断システムの京大への貸与によってその内容理解を深めて有効な活用をはかるために研究代表者を松岡猛に交代し、メンバー構成も絞り、エネルギー理工学研究所でのフィールド実験を加速して上記目標の確実な達成を図ることを期待する。

謝辞

この共同研究の実施期間にわたり、3 か年ご支援頂いた京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッション研究拠点の皆様には厚く感謝します。また、共同研究の実施に当たり、協力いただいたエネルギー理工学研究所へリオトロン実験施設の東使 潔技術職員、会議室の予約、ZOOM 会議の運営や大型ポスターの製作で協力いただいたエネルギー理工学研究所の高塚真理技術職員および森下研究室の石井令乃奈さん、祝 梁帆(Zhu Liangfan)さん、陳 昱婷(Chen Yuting)さん、その他大学院学生とシンビオ社会研究会事務局の吉川憲二氏に感謝します。

参 考 文 献

- (1) Symbio N&R, Vol.12,No.1, 2023 (symbio-newsreport.jpn.org) . . . [こちら](#)
- (2) Do, Vol.12, No.2,2023 (do). . . . [こちら](#)
- (3) Do, Vol.12, No.3,2023 (do). . . . [こちら](#)
- (4) Do, Vol.12, No.6,2023 (do). . . . [こちら](#)
- (5) Do, Vol.12, No.8,2023 (do). . . . [こちら](#)

- (6) T. Matsuoka, S. Kobayashi, K. Morishita, H. Yoshikawa: Availability Analysis of Heliotron J Water-cooling System by the GO-FLOW methodology, PSAM17&ASRAM2024, 7-11 October, 2024, Sendai International Center, Sendai, Miyagi, Japan.

(注)参考文献の箇所で、「こちら」で閲覧できるのは令和7年2月23日現在、シンビオ正会員、賛助会員の方のみです。

～～～付 録 集～～～

付録1 発表者：新田 純也

- ① ヘリオトロンJ設備を対象とする高調波診断システムの適用研究 (2024年6月26日)・・・[こちら](#)
- ② 電気機器高調波診断システムのヘリオトロンJへの適応 (2024年10月29日)・・・[こちら](#)
- ③ 高調波診断システムの方法論の解説とAI応用の可能性 (2024年12月27日)・・・[こちら](#)

付録2 発表者：松岡 猛

- ① GO-FLOW解析法の適用研究 (2024年6月26日)・・・[こちら](#)
- ② 動的信頼性解析GO-FLOWのヘリオトロンJへの適用 (2024年10月29日)・・・[こちら](#)
- ③ ChatGPTによるGO-FLOW解析の支援 (2024年12月27日)・・・[こちら](#)

付録3 発表者：高橋 信

故障生起汎化知識による故障メカズムの構造化表現 (2024年6月26日)・・・[こちら](#)

付録4 発表者：五福 明夫

機能の概念と機能モデルに基づく運転支援 (2024年10月29日)・・・[こちら](#)

付録5 発表者：森下 和功

照射脆化予測とRPVの劣化管理 (2024年10月29日)・・・[こちら](#)

付録6 発表者：出町 和之

大規模言語モデルLLMの解説と応用の展望 (2024年10月29日)・・・[こちら](#)

付録7 発表者：吉川 榮和、新田 純也、松岡 猛、五福 明夫、高橋 信、 森下 和功、安部 正高

付属ポスター・・・[こちら](#)

付属ポスターの構成・・・[こちら](#)

Experimental research on the sophistication of advanced information infrastructure for the operation and maintenance of complex energy systems (ZE2024N-02)

(2024年12月11日Ze国際シンポジウムポスターセッション発表)